Agriculture, Pêcheries et Alimentation
Québec

Document d'information
Direction générale des pêches et de l'aquaculture commerciales

Qualité de l'eau requise pour l'élevage des salmonidés

(mise à jour : mars 1998)

Richard Morin, biologiste
Station technologique piscicole des eaux douces

Table des matières

1.0 Introduction 1
2.0 Température 2
3.0 Acidité, alcalinité et pH 4
4.0 Oxygène (O_2) 9
5.0 Azote gazeux (N_2) 13
6.0 Dioxyde de carbone (CO_2) 16
7.0 Ammoniac ($NH_3 + NH_4^+$), Nitrites (NO_2^-), Nitrates (NO_3^-) 19
8.0 Solides en suspension 23
9.0 Fer ($Fe^{+2} + Fe^{+3}$) 24
10.0 Synthèse des paramètres de la qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés 26

1.0 Introduction

Les poissons sont des animaux aquatiques et, en conséquence, l'eau est leur milieu de vie exclusif. Ils doivent y retrouver toutes les conditions qui sont essentielles à leur survie et à leur croissance (nourriture, température, oxygène, salinité, etc.). Par ailleurs, les familles et les espèces de poissons ont toutes des besoins spécifiques. Les salmo-nidés, comme l'omble de fontaine, la truite arc-en-ciel et l'omble chevalier, sont des poissons d'eau douce et d'eau froide qui sont très exigeants en terme de qualité physico-chimique. Ces exigences élevées proviennent des caractéristiques du milieu naturel d'où elles sont originaires. Les salmo-nidés habitent des lacs et cours d'eau froide et bien oxygénée dans des milieux naturels peu productifs (oligotrophes) et non pollués. Il faut donc fournir à ces poissons, pour leur élevage, une qualité d'eau qui leur convienne.

Cependant, toutes les propriétés de l'eau sont susceptibles de varier sous l'influence de l'élevage intensif des poissons. Le rejet des produits d'excrétion dans l'eau est le principal agent responsable de la modifi-cation de la qualité de l'eau dans les bassins d'élevage. Bien que les poissons d'élevage, du fait de leur domestication, sont plus to-lérants que les poissons sauvages aux conditions d'eau, des limites extrêmes ne doivent pas être dépassées, au-delà des-quelles l'eau devient impropre à l'élevage.

La connaissance de la biologie des salmo-nidés et la pisciculture intensive de ces poissons ont permis de déterminer les qualités physico-chimiques de l'eau qui doivent être respectées pour obtenir de bonnes performances d'élevage. Par ailleurs, l'élevage intensif a aussi permis de déter-miner assez précisément la production des résidus d'excrétion qui s'accumulent dans l'eau et la rendent inévitablement impropre après une certaine utilisation. Sommai-rement, les modifications de la qualité de l'eau résultant de l'élevage intensif sont les suivantes :

- ↑ de la température en été et ↓ de la température en hiver ;
- ↓ de la concentration en O_2 ;
- ↑ de la concentration des solides en suspension (MES) ;
- ↑ de la concentration de l'ammoniac (NH_3 - NH_4^+) ;
- ↑ de la concentration de CO_2 ;
- ↓ du pH ;
- ↑ de la concentration des bactéries et des champignons.

L'objet du présent document est d'étudier ces paramètres en donnant pour chacun d'eux leur nature et leur provenance, leur toxicité et les limites de tolérance des salmonidés à chacun d'eux, les méthodes de leur dosage dans l'eau et les moyens de les contrôler. D'autres paramètres comme les métaux ou l'azote gazeux sont également étudiés en considération de leur importance sur la qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés. Le document se termine par un tableau qui collige les critères de qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés.

2.0 Température

2.1 Nature et provenance

La température de l'eau est très dépendante de son contact avec l'air ambiant. Pour les eaux de surface, soit les cours d'eau et les lacs, ce contact est direct. Les eaux souterraines, emmagasinées dans la nappe phréatique, qui émergent naturellement par les sources ou qui sont pompées dans des puits sont moins en contact direct avec la température de l'air.

Les eaux de cours d'eau, de lacs et de la nappe phréatique sont utilisées pour l'éle-vage. De façon générale, les températures des cours d'eau présentent les plus grandes variations et sont souvent plus froides ou plus chaudes que l'optimum recommandé pour l'élevage des salmonidés. En hiver, elles sont trop froides et atteignent des minimums 0,5 °C à 1,0 °C de décembre à mars. Elles dépassent l'optimum en été où elles atteignent au maximum 18 °C à 24 °C, en juillet et août. Les eaux de lacs profonds, dû à l'importance de la masse d'eau qui régularise les variations de températures, présentent des écarts moins importants de température en profondeur qu'en surface. Ces lacs ont des températures en profondeur qui se situent entre 2 °C et 4 °C au minimum, pendant les mois d'hiver et un maximum de 15 °C à 16 °C, pendant l'été. L'eau de source ou de puits est la plus constante au point de vue des températures et varie entre 3 °C et 8 °C en hiver et entre 8 °C et 12 °C en été. Le Tableau 1 donne trois profils de températures caractéristiques des eaux utili-sées au Québec pour l'élevage des salmonidés. L'utilisation d'eau de puits pen-dant l'hiver et un mélange d'eau de puits et de surface pendant les mois plus chauds offre le meilleur profil de températures pour la croissance de la truite tout au long de l'année.

2.2 Effet sur les poissons

La température de l'eau joue un rôle prédominant sur le métabolisme des pois-sons et ainsi sur la croissance. Tandis que les animaux supérieurs, tels que les mammifères et les oiseaux, peuvent main-tenir leur température corporelle constante (homéothermie), peu importe la température de l'environnement, les poissons sont poïkilothermes, c'est-à-dire que leur température corporelle varie en fonction de celle de l'eau. Les températures chaudes accélèrent le métabolisme et stimulent la croissance des poissons. À l'inverse, les températures froides ralentissent le métabolisme et la croissance. Il en résulte que la température de l'eau est le facteur le plus important qui influence la croissance des poissons en présence d'une alimentation abondante. Cette particularité a une grande importance en pisciculture, où la croissance la plus rapide possible est recherchée pour des raisons de rendement de production et de rentabilité.

Tableau 1 : Températures caractéristiques de trois types d'approvisionnement en eau utilisés au Québec pour l'élevage des salmonidés

Mois	Temperatures (C)		
	Puits + surface	Source	Surface
Janvier	6,5	4	1
Février	6,5	4	1
Mars	8	4	1
Avril	10	4	3
Mai	12	6	12
Juin	14	10	17
Juillet	14	14	18
Août	14	14	18
Septembre	13	12	13
Octobre	10	10	8
Novembre	8	5,5	1
Décembre	8	5,5	1

La Figure 1 illustre la croissance de la truite arc-en-ciel depuis un poids de 10 g jusqu'à 1 000 g aux températures de l'eau de surface, de source et de puits et de surface mélangée. La croissance la plus lente est obtenue avec l'eau de surface, où la truite atteint près de 1 000 g aprèps 26 mois. L'eau de source permet une croissance plus rapide et la truite atteint 1 000 g à 22 mois.

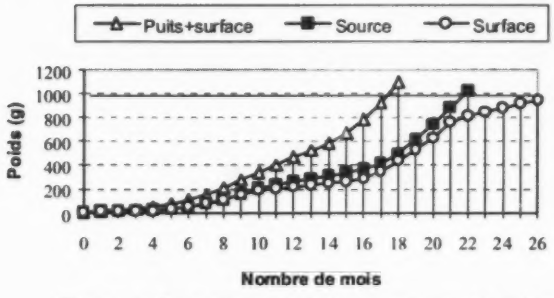


Figure 1: Croissance de la truite arc-en-ciel selon le type d'approvisionnement en eau utilisé

Le mélange d'eau souterraine et de surface permet d'obtenir la meilleure croissance, où la truite dépasse 1 000 g à 18 mois.

La température a aussi une influence sur d'autres paramètres physico-chimiques de l'eau qui ont un effet sur le poisson. Les changements de température modifient la solubilité et les équilibres chimiques. Lorsque la température de l'eau augmente, la solu-bilité des gaz (N_2, 0_2 et $C0_2$) diminue. Par exemple, la concentration en oxygène de l'eau à la saturation est inférieure de 30 % à la température de 18 °C (9,5 mg/L) par rapport à celle rencontrée à 3 °C (13,5 mg/L).

L'élévation de la température de l'eau rend le poisson plus actif et entraîne une aug-mentation de sa consommation d'aliments et ainsi d'oxygène. Par ailleurs, en même temps que la demande en oxygène du poisson augmente, l'élévation de la tem-pérature diminue la solubilité de l'oxygène dans l'eau. L'effet combiné de ces deux facteurs peut entraîner un stress au poisson en présence d'un apport en oxygène insuffisant.

La même élévation de température triple le pourcentage de l'ammoniac (NH_3 + NH_4^+) qui se trouve sous la forme toxique (NH_3) La température influe aussi sur le pH par l'effet qu'elle exerce sur la dissociation des acides et la solubilité du $C0_2$. Cet effet est peu marqué, parce qu'en général, une aug-mentation de

température de 20 °C abaisse le pH de seulement 0,l unité.

2.3 Limites de tolérance des salmonidés

La zone optimale de température pour la croissance des salmonidés varie quelque peu selon les espèces (Tableau 2), mais se situe entre 7 °C et 17 °C pour les espèces élevées au Québec. Pour cette raison, les salmonidés en général, soit les truites, ombles et saumons, sont considérés comme des espèces d'eau froide. D'autres poissons comme le doré, la perchaude et la carpe sont des espèces d'eau tiède et les températures optimales de croissance sont plus élevées, soit supérieures à 20 °C.

Tableau 2 : Températures optimales pour la croissance de certains salmonidés

Espèces	Températures (C)
Omble de fontaine	7 - 13
Omble chevalier	8 - 10
Truite arc-en-ciel	10 - 15,5
Truite brune	9 - 15,5
Saumon atlantique	10 -17

Adapté de Piper R.G *et al* 1982

2.4 Moyens de contrôle

Les entreprises piscicoles qui produisent des salmonidés doivent donc essayer, dans la mesure du possible, de maintenir la température de l'eau d'élevage dans les gradients thermiques optimums pour l'espèce élevée. Cependant, le chauffage ou le refroidisse-ment de l'eau pour l'engraissement des poissons étant trop onéreux pour être envisageables sur le plan économique, compte tenu des débits requis, les pisci-culteurs doivent faire au mieux avec les températures naturelles des différentes sources d'approvisionnement dont ils dis-posent. Comme nous l'avons montré précé-demment, les profils de températures sont différents dans l'année selon le type d'approvisionnement en eau disponible, soit souterrain, d'un cours d'eau ou d'un lac, et les pisciculteurs choisissent selon la dispo-nibilité la source d'approvisionnement la plus adéquate ou un mélange de deux.

2.5 Références

Piper, R.G., I.B. McElwain, L.E. Orme, J.P. McCraren, L.G. Fowler et J.R. Leonard 1982 Fish hatchery management. U.S. Fish and Wildlife Service, Department of the Interior. 517 p.

3.0 Acidité, alcalinité et pH

3.1 Nature et provenance

Un élément acide est capable de libérer des ions hydrogène (H^+) et un élément alcalin est capable de libérer des ions hydroxyde (OH^-). Ces ions sont les principales variables des systèmes aqueux, car ils influent considérablement sur les processus physiques, chimiques et biologiques qui se déroulent dans l'environnement (CCME 1987). L'eau présente une forte aptitude à solubiliser un grand nombre de substances, elle est qualifiée de solvant universel. L'eau dissout les substances ionisables grâce à sa forte constante diélectrique qui lui permet d'ioniser et de dissocier même des substances non ioniques à l'état pur. Elle favorise donc la dissociation

des éléments en ions acides (H^+) et basiques (OH^-).

L'acidité est la mesure de la capacité de l'eau à neutraliser une base, donc de la concentration des composés qui peuvent se dissocier dans l'eau en libérant des ions H^+. Les acides minéraux en solution dans l'eau et l'acide carbonique (H_2CO_3), formé dans l'eau par le CO_2 produit par la respiration des organismes vivants, sont les principaux éléments responsables de l'acidité de l'eau.

L'alcalinité est la mesure de la capacité de l'eau à neutraliser un acide, donc de la concentration des composés qui peuvent se dissocier dans l'eau en libérant des ions OH^-. Les bicarbonates (HCO_3^-), les carbonates (CO_3^{-2}) et les hydroxydes (OH^-) sont les principaux éléments responsables de l'alcalinité de l'eau.

Ces éléments acides et basiques peuvent être en partie dissociés dans l'eau, alors que l'autre partie ne l'est pas et constitue une réserve. Ces molécules de réserve, addi-tionnées à celles qui sont dissociées, représentent l'acidité et l'alcalinité totale de l'eau. C'est cette dernière valeur que l'on mesure lorsque l'on fait l'analyse de l'acidité et de l'alcalinité de l'eau.

Le pH est la résultante de l'interaction de nombreuses substances en solution dans l'eau et aussi de nombreux phénomènes biologiques qui s'y déroulent. Le pH indique l'état d'équilibre entre les acides et les bases et est une mesure de la concentration des ions H^+ libres en solution dans l'eau. Les ions H^+ libres sont responsables de l'état acide de l'eau et les ions OH^- libre de l'état alcalin. Un pH de 7 est neutre, c'est-à-dire ni acide ni alcalin, il y a alors autant d'ions H^+ et OH^- libres en solution dans l'eau. Au fur et à mesure que le pH diminue en bas de 7, la concentration des ions H^+ libres en solution dans l'eau augmente de plus en plus et le pH devient de plus en plus acide. Au fur et à mesure que le pH augmente en haut de 7, la concentration des ions H^+ libres diminue de plus en plus et le pH devient de plus en plus alcalin. Les réserves alcalines et acides de l'eau, résultant respectivement de l'acidité et de l'alcalinité de l'eau, constituent le pouvoir tampon de l'eau, c'est-à-dire la sensibilité plus ou moins prononcée de son pH à varier si l'on ajoute un acide ou une base à l'eau.

L'échelle de pH est logarithmique, c'est-à-dire qu'il y a un facteur 10 entre deux unités de pH. À titre d'exemple, une eau à pH de 6 est 10 fois plus acide qu'une eau à pH de 7 et contient ainsi 10 fois plus d'ions H^+. Cela a un grande importance parce qu'une faible variation du pH de l'eau peut causer un stress important pour le poisson.

Dans les eaux piscicoles, les principaux éléments qui peuvent influencer le pH de l'eau sont :

1- La libération de CO_2 par la respiration des poissons qui favorise une baisse du pH par la libération d'ions H^+ :

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{-2}$$

2- La libération de l'ammoniac suite à la digestion des protéines par les poissons, laquelle favorise une augmentation du pH par la libération d'ions OH^-:

$$NH_3 + H_2O \leftrightarrow NH_4^+ + OH^-$$

3- La nitrification de l'ammoniac favorise une baisse du pH par la libération d'ions H^+ :

$$NH_4^+ + CO_2 + O_2 \rightarrow \underline{nitrosomonas} \rightarrow C_5H_7O_2N + NO_2^- + H_2O + H^+$$

$$NO_2^- + CO_2 + NH_4^+ + O_2 + H_2O \rightarrow \underline{nitrobacter} \rightarrow C_5H_7O_2 + NO_3^- + H^+$$

Les pluies acides, la fonte des neiges et les cours d'eau qui drainent un milieu boisé en conifères favorisent la présence d'une eau plus acide. Les eaux de marais et de tourbières, à réserves alcalines faibles, ont un pH acide.

3.2 Toxicité

Ce qui compte beaucoup pour le pH en pisciculture, c'est sa stabilité. Les poissons d'élevage sont adaptés à une valeur moyenne de pH et supportent mal de fortes et brusques variations de celui-ci (Huet 1970). Les conditions biologiques sont bien meilleures dans une eau à pH sensiblement constant que dans une eau subissant des variations importantes.

L'effet toxique du pH de l'eau peut se manifester à deux niveaux chez les poissons, d'une part, par un effet direct sur le pH du sang du poisson et, d'autre part, en augmentant la toxicité de certaines subs-tances présentes dans l'eau d'élevage. Le poisson serait plus sensible à une baisse brutale du pH qu'à une hausse (SIGMA 1983a). Une baisse brutale du pH de l'eau peut entraîner une baisse du pH du sang qui est qualifiée d'acidose. La baisse du pH dans le sang du poisson diminue la capacité de l'hémoglobine du sang à transporter l'oxygène (SIGMA 1983b). Les symptômes caractéristiques sont l'excitabilité, le halète-ment et la production excessive de mucus par les branchies irritées (Chemillier 1997).

Par ailleurs, le pH de l'eau a un effet sur la toxicité de plusieurs éléments qui sont dissociés différemment selon le pH de l'eau. Certains sont des résidus métaboliques rejetés par les poissons (CO_2 et ammoniac), il y a certains métaux dissous dans l'eau (Fer) et certains produits d'usage prophy-lactique (iodophores pour la désinfection des œufs) ou curatifs (sulfate de cuivre). Un pH acide a un effet sur davantage d'éléments, en effet, il augmente la toxicité du CO_2, des iodophores et du sulfate de cuivre. Un pH alcalin, par contre, augmente la toxicité de l'ammoniac et du Fer. Au chapitre de la toxicité des éléments affectés par un pH acide, la réserve alcaline de l'eau (alcalinité) revêt toute son importance pour tamponner le pH et empêcher les variations brusques de ce dernier. L'alcalinité de l'eau doit être au moins de 15 à 20 mg/l de $CaCO_3$, quand le pH est à la limite inférieure de 6,5, pour être acceptable pour la production piscicole (SIGMA 1983a).

3.3 Limites de tolérance des salmonidés

La meilleure eau piscicole est celle qui possède une réaction neutre à légèrement alcaline : pH compris entre 7,0 et 8,0. Donc, une eau qui contient une bonne réserve alcaline (un bon pouvoir tampon) est moins sujette aux variations de pH (Huet 1970).

La Figure 2 illustre les limites de tolérance des salmonidés au pH de l'eau. Les pH recommandés doivent se situer entre les limites de 6,5 et 8,5 (SIGMA 1983a). Les pH inférieurs ou supérieurs à ces limites sont débilitants pour les salmonidés, qui sont graduellement plus affectés à mesure que l'on s'en éloigne. Il a été démontré chez l'omble de fontaine que les pH inférieurs à 5,5 diminuent la croissance, la production d'œufs et retardent l'ovulation (Tam et Payson 1986 ; Tam *et al* 1986). Pour la plupart des poissons, le pH acide critique est voisin de 4,5 (Huet 1970). La truite arc-en-ciel exposée à des pH de 9,5 à 9,8 montre des signes de stress et de la mortalité survient (Murray et Ziebell). La limite su-périeure de pH serait de 9,2 pour les truites (Huet 1970).

L'alcalinité de l'eau doit être au minimum de 20 mg/l pour assurer une bonne protection contre l'acidification de l'eau suite à l'accu-mulation du CO_2 rejeté par les poissons.

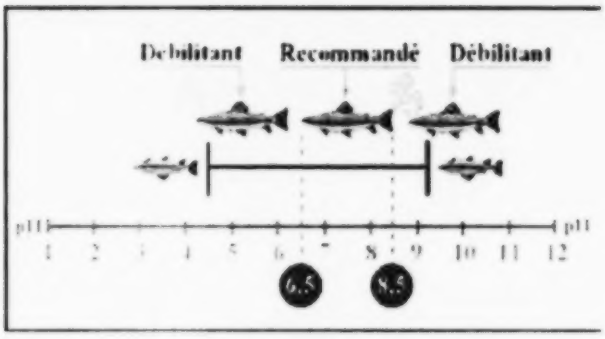


Figure 2 [illegible]

3.4 Dosage

L'alcalinité : Le dosage de l'alcalinité s'effectue par une analyse chimique, la titration.

Principes de la titration : Deux produits principaux sont utilisés dans une titration : un indicateur couleur et un titrant. L'indicateur couleur est ajouté à une quantité connue d'eau à analyser. Cet indicateur va changer de couleur à un pH connu, par exemple à 4,5 (bromocrésol vert-méthyl rouge) ou 8,3 (phénolphtaléine). Le changement de cou-leur est appelé point de virage.

Le titrant, un acide ou une base, est ensuite ajouté goutte à goutte dans l'échantillon d'eau coloré. Le titrant réagit chimiquement avec les composés présent dans l'eau à analyser. Quand tous les composés de l'eau sont neutralisés par le titrant, l'échantillon d'eau change de pH, et par conséquent, de couleur. Pour connaître la quantité de composés chimiques présente dans l'eau, déterminant par exemple son alcalinité ou sa dureté, il suffit de mesurer la quantité de

titrant qui a été nécessaire pour effectuer le changement de couleur. Il faut ensuite appli-quer une formule mathématique qui tient compte de la concentration du titrant et du volume d'eau qui a été analysé.

Titration de l'alcalinité : Les eaux naturelles ont le plus souvent un pH supérieur à 4,5. Elles sont donc alcalines par rapport à ce pH, et, par convention, l'alcalinité totale d'une eau est mesurée par la quantité d'a-cide nécessaire pour abaisser son pH à 4,5. Lorsque le pH est situé entre 4,5 et 8,3, l'indicateur couleur utilisé est le bromo-crésol vert-méthyl rouge, et l'alcalinité est attri-buable aux bicarbonates (HCO_3^-). À un pH supérieur à 8,3, la phénolphtaléine est utili-sée comme indicateur, et l'alcalinité est attribuable aux carbonates (CO_3^{-2}) et aux hydroxydes (OH^-).

Particularités : Les délais d'expiration indi-qués sur les sachets de réactifs fournis dans les trousses d'analyses de terrain doivent être respectés. Les trousses doivent par ailleurs être entreposées au sec entre 10 et 25 °C, pour maximiser la conservation des produits chimiques.

pH : Le pH de l'eau peut être déterminé par une méthode électro-chimique (pH-mètre) et une méthode chimique (colorimétrie). La méthode colorimétrique est peu coûteuse et fréquemment utilisée sur le terrain. Elle se fait en choisissant des indicateurs dont les couleurs sont très dépendantes du pH. Les indicateurs colorés utilisés réagissent avec les ions H^+ disponibles pour atteindre un équilibre. Cet équilibre correspond à une certaine couleur dépendant du pH. Par exemple, le bleu de bromothymol présente une coloration jaune à pH 6,0 et une coloration bleue à pH 7,6. Une charte de couleur correspondant à l'échelle de pH se présente sous la forme d'un disque coloré utilisé comme comparateur. Il est important de noter que le disque comparateur est spécifique à une trousse de terrain et ne doit pas être utilisé dans une autre trousse.

Particularités : L'appréciation visuelle peut être difficile. L'éclairage doit être adéquat. Une surface de fond blanche (feuille de papier, neige) facilite la lecture. Il est impor-tant d'effectuer l'analyse de l'échantillon d'eau dans les plus brefs délais, car les échanges gazeux impliquant la présence de gaz carbonique modifient le pH.

3.5 Moyens de contrôle

Plusieurs endroits au Québec recèlent la présence d'eau à tendance acide. Ce pro-blème se manifeste principalement en association avec la fonte de la neige au printemps et lors de dégels subis en hiver. Les eaux qui ne disposent pas d'un pouvoir tampon élevé (alcalinité < 20 mg/l) sont fortement affectées par les pics d'acidité, où on observe une baisse du pH qui peut être importante et qui risque d'affecter les poissons.

Il existe la possibilité d'ajouter un produit alcalin dans l'eau pour remonter le pH. Cela se pratique principalement pour l'eau des écloseries et dans les étangs. Le carbonate de calcium ($CaCO_3$), appelé aussi la chaux agricole, est un excellent produit pour neu-traliser le pH de l'eau. La chaux agricole est composée à 90 % de $CaCO_3$ et est vendue en poudre très fine qui se dissous lentement dans l'eau. Elle est d'un usage sécuritaire parce qu'elle ne permet pas d'élever le pH à plus de 7 ou 8. Il est aussi possible d'a-baisser un pH trop élevé par l'ajout d'acide chlorhydrique (HCl) dans l'eau au moyen d'une pompe doseuse. Cette pratique est réalisable pour les petits débits d'une écloserie.

Le contrôle du pH est nécessaire dans les unités de production en circuit fermé, où le taux de renouvellement de l'eau est insuffisant pour maintenir sa stabilité. En effet, on y observe des baisses de pH consé-cutives à la production de CO_2, tant par le processus de nitrification bactérienne à l'intérieur du filtre biologique que par le cheptel lui-même. Il est donc nécessaire de remonter le pH par l'ajout de produits alcalins, tel que l'injection de lait de chaux par pompe doseuse par exemple.

3.6 Références

CCME 1987. Recommandations pour la qualité des eaux au Canada. Conseil canadien des ministres de l'environnement. Documents du CCME, a/s Publications officielles du Manitoba, 200, rue Vaugham, Winnipeg (Man.) R3C 1T5 Canada, p. 6-1 et 6-2.

Chemillier J. 1997. Des techniques simples pour équilibrer le pH des étangs. Aqua Revue (69) :20-21.

Dugas Isabelle et Dugas Claude,1983, Manuel Analyse de l'eau Hach, Éditions Cofradis France

Greenberg Arnold E., 1992, Standard Methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association, United States, ISBN 0-87553-207-1, 1100 p.

Huet, M. 1970. Traité de pisciculture. Éditions Ch de Wyngaert, Avenue Georges Henri, 296, 1 200 Bruxelles, p. 519-521.

Murray, C.A. et C.D. Ziebell 198 ? Acclimatation of Rainbow Trout to high pH to prevent stocking mortality in summer.

Tam, W.H. et P.D. Payson 1986. Effects of chronic exposure to sublethal pH on growth, egg production, and ovulation in Brook Trout, *Salvelinus fontinalis*. Can. J. Fish Aquat. Sci. 43 : 275-280.

Tam, W.H., P.D. Payson et R.J.J. Roy 1986. Retardation and recovery of growth in Brook Trout fry (*Salvelinus fontinalis*) exposed for various durations to acidified water. Can. J. Fish Aquat. Sci. 43 : 2 048-2 050.

SIGMA Environmental Consultants Ltd 1983a. Summary of water quality criteria for salmonids fishes. Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 49-52.

SIGMA Environmental Consultants Ltd 1983b. Summary of water quality criteria for salmonids fishes. Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 53-58.

Tarda-Henry Monique, 1992, Chimie des Eaux, Éditions le Griffon d'argile, 7649 boul. Wilfrid-Hamel, Ste-Foy, ISBN 2-920922-87-4, 537 p.

4.0 Oxygène (O_2)

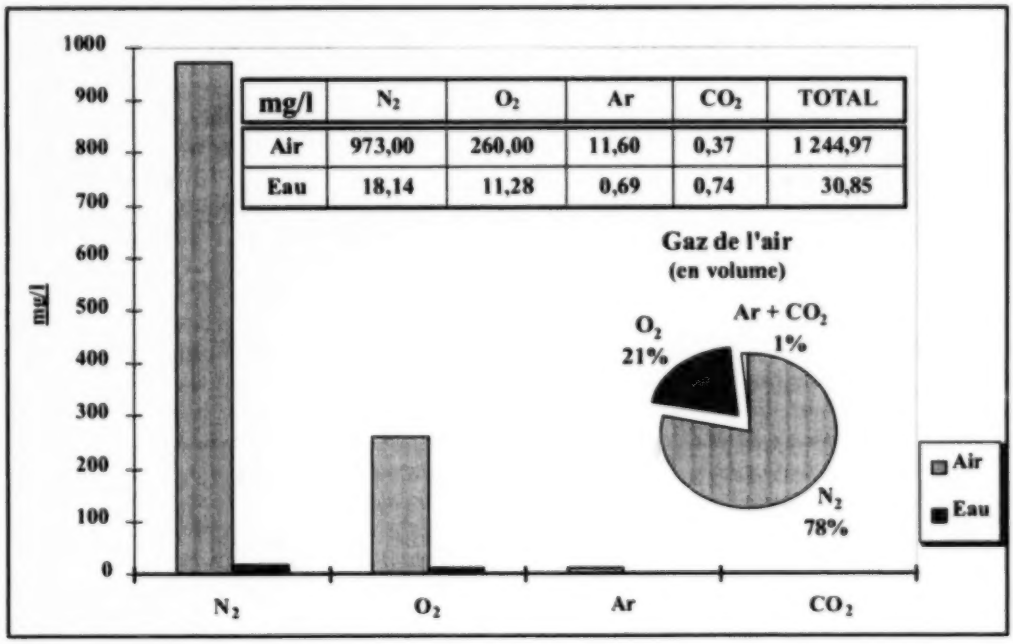
4.1 Nature et provenance

L'Oxygène (O_2) est un gaz. Il est présent dans l'eau et provient de 2 sources :

1- de la dissolution de l'O_2 provenant de l'air ;
2- de l'activité photosynthétique des algues et plantes vertes.

1- Dissolution de l'O_2 de l'air

L'oxygène que les poissons respirent dans l'eau est l'oxygène gazeux (O_2), le même que tous les animaux terrestres respirent dans l'air. Ce gaz est en solution dans le liquide sous l'effet de la pression atmos-phérique. La concentration de l'oxygène dans une eau, qui ne contient pas d'algues ou de plantes aquatiques, provient essen-tiellement d'une diffusion de l'oxygène de l'air dans l'eau. Cette diffusion est passive, obéit à la loi des gaz et résulte de la pression atmosphérique. Par rapport à l'air, l'eau est pauvre en oxygène. Un litre d'air contient 260 mg d'oxygène à la pression atmos-phérique de 760 mm Hg, alors qu'un litre d'eau à 10°C en contient 11,3 mg à la saturation, soit 23 fois moins (Figure 3).



mg/l	N_2	O_2	Ar	CO_2	TOTAL
Air	973,00	260,00	11,60	0,37	1 244,97
Eau	18,14	11,28	0,69	0,74	30,85

Figure 3: Concentration des gaz dans l'air et dans l'eau (T^o=10° C) et la répartition volumétrique des gaz dans l'air

Les facteurs qui influencent la dissolution de l'oxygène atmosphérique dans l'eau sont la température de l'eau, la pression baro-métrique et l'agitation de l'eau. La concen-tration d'oxygène à la saturation dans l'eau est inversement proportionnelle à la tempé-rature de l'eau (Tableau 3). L'eau froide contient plus d'oxygène que l'eau chaude. La pression

barométrique a aussi une in-fluence, mais peu marquée par rapport à la température de l'eau. Plus la pression barométrique est faible et moins elle peut faire diffuser d'oxygène dans l'eau. Cela se manifeste en altitude où la pression baro-métrique est plus faible qu'au niveau de la mer. La pression barométrique a peu d'influence au Québec où les entreprises piscicoles sont situées à des altitudes faibles par rapport au niveau de la mer. Il semble qu'une chute brutale de la pression baro-métrique, avant un orage par exemple, entraînerait une diminution de la concen-tration en oxygène dans l'eau. L'agitation et le fractionnement de l'eau ont un effet mar-qué sur la diffusion de l'oxygène dans l'eau en favorisant les échanges gazeux entre l'eau et l'air. D'ailleurs, cela est mis à profit par certains systèmes d'oxygénation tels que les aérateurs de surface, les cascades et les colonnes d'aération et dégazage.

Tableau 3 : Concentrations d'oxygène (mg/l) à la saturation dans l'eau distillée à la pression atmosphérique normale (760 mm Hg) selon la température de l'eau

Températures (°C)	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	14,64	14,61	14,57	14,53	14,49	14,45	14,41	14,37	14,33	14,29
1	14,25	14,21	14,17	14,13	14,09	14,05	14,03	13,98	13,94	13,90
2	13,86	13,82	13,79	13,75	13,71	13,68	13,64	13,60	13,56	13,53
3	13,49	13,46	13,42	13,38	13,35	13,31	13,28	13,24	13,20	13,17
4	13,13	13,10	13,06	13,03	13,00	12,96	12,93	12,89	12,86	12,82
5	12,79	12,76	12,72	12,69	12,66	12,62	12,59	12,56	12,53	12,49
6	12,46	12,43	12,40	12,36	12,33	12,30	12,27	12,24	12,21	12,18
7	12,12	12,11	12,08	12,05	12,02	11,99	11,96	11,93	11,90	11,87
8	11,84	11,81	11,78	11,75	11,72	11,70	11,67	11,64	11,61	11,58
9	11,55	11,52	11,49	11,47	11,44	11,41	11,38	11,35	11,33	11,30
10	11,27	11,24	11,22	11,19	11,16	11,14	11,11	11,O8	11,06	11,03
11	11,00	10,98	10,95	10,93	10,90	10,87	10,85	10,82	10,80	10,77
12	10,75	10,72	10,70	10,67	10,65	10,62	10,60	10,57	10,55	10,52
13	10,50	10,48	10,45	10,43	10,40	10,38	10,36	10,33	10,31	10,28
14	10,26	10,24	10,22	10,19	10,17	10,15	10,12	10,10	10,08	10,06
15	10,03	10,01	9,99	9,97	9,95	9,92	9,90	9,88	9,86	9,84
16	9,82	9,79	9,77	9,75	9,73	9,71	9,69	9,67	9,65	9,63
17	9,61	9,58	9,56	9,54	9,52	9,50	9,48	9,46	9,44	9,42
18	9,40	9,38	9,36	9,34	9,32	9,30	9,29	9,27	9,25	9,23
19	9,21	9,19	9,17	9,15	9,13	9,12	9,10	9,08	9,06	9,04
	9,02	9,00	8,98	8,97	8,95	8,93	8,91	8,90	8,88	8,86

2- L'activité photosynthétique

L'oxygène dissous dans l'eau peut aussi provenir de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. Cepen-dant, l'effet des plantes sur la concentration d'oxygène dans l'eau n'est à considérer que pendant la saison de végétation et dans les

étangs à faible taux de renouvellement de l'eau, où la prolifération des algues est importante. En général, le taux élevé de renouvellement de l'eau dans les structures intensives de production, qu'elles soient des bassins ou des étangs d'engraissement, ne permet pas de prolifération importante des algues et un effet marqué sur la concen-tration de l'oxygène.

4.2 Toxicité

L'oxygène ne présente aucune toxicité pour les poissons même à de très fortes concentrations. Il a été démontré en faisant des expériences avec l'O_2 pur que des concentrations aussi élevée que 40 mg/l ne présentaient aucun inconvénient pour les salmonidés. À l'inverse, une concentration insuffisante en oxygène dans l'eau présente un effet adverse pour le poisson qui a de la difficulté à respirer. Il a été démontré qu'une concentration inférieure à 2 - 3 mg/l (20 - 30 %) de la saturation entraîne la mort des truites. Par ailleurs, bien avant d'atteindre la concentration létale, une concentration en oxygène insuffisante dans l'eau présente un problème pour la truite qui doit faire un effort pour respirer. Il a donc été démontré par l'expérimentation que la concentration en oxygène dans l'eau doit être au moins de 65 % de la concentration à la saturation pour que la truite soit dans une bonne condition d'élevage. C'est une question de pression partielle du gaz dans l'eau, laquelle doit toujours être supérieure à 100 mm Hg pour que les échanges gazeux se fassent sans effort au niveau des branchies, la pression partielle de l'oxygène dans le sang du poisson étant d'environ 80 mm de Hg.

4.3 Limites de tolérance des salmonidés

Il est recommandé que la concentration en oxygène de l'eau à la sortie des bassins et étangs d'élevage soit toujours supérieure à 65 % de la concentration à la saturation.

4.4 Dosage

La concentration en oxygène peut être mesurée par une méthode chimique ou à l'aide d'un appareil électronique (l'oxy-mètre). Ce dernier étant le plus utilisé, nous en présentons les notions de base.

Principes de fonctionnement

Un oxymètre est un appareil électronique relié électriquement à une sonde qui est plongée dans l'eau. Cette dernière est composée de deux électrodes qui baignent dans une solution de chlorure de potassium (KCl). Une membrane perméable à l'oxygène et aux ions isole les électrodes et la solution électrolytique de l'eau.

L'oxymètre génère une tension électrique entre les deux électrodes situées dans la sonde et mesure un courant généré en proportion de la concentration d'oxygène présente au moyen d'un micro-ampèremètre intégré.

La réaction électrochimique consomme l'oxygène qui est présent dans l'eau située au contact de la membrane, il faut donc agiter légèrement la sonde pour renouveler continuellement cette eau.

L'étalonnage de l'oxymètre

L'étalonnage de l'oxymètre doit être fait à chaque fois que l'appareil est mis sous tension pour effectuer des mesures. Il est important de le laisser sous tension pendant toute la durée d'une longue série de mesures afin d'éviter d'avoir à le réétalonner. Il se fait en mesurant les concentrations en oxygène de milieux de concentrations connues. Une eau de concentration à 0 mg/l d'oxygène peut être utilisée pour étalonner l'appareil à sa valeur inférieure. Il suffit d'a-jouter du sulfite de sodium dans une proportion de 0,1 à 0,5 g/l dans un contenant d'eau pour que tout l'oxygène présent soit consommé. L'étalonnage à la saturation s'obtient en plaçant la sonde dans un air à 100 % d'humidité relative. Cela se fait en général dans le petit contenant qui recouvre l'extrémité de la sonde. Il est muni d'un tampon que l'on

doit imbiber d'eau régu-lièrement afin de créer à l'intérieur cette atmosphère à 100 % d'humidité. Cela permet aussi de maintenir humide la membrane de la sonde pendant le remisage de l'appareil. L'appareil est ainsi ajusté à sa valeur inférieure de 0 mg/l d'oxygène et à la valeur de la concentration maximale à la saturation pour une température donnée selon les tables de saturation en oxygène déjà établies.

Procédure habituelle de mise en service

La procédure habituelle inscrite dans les manuels d'instruction de ces appareils est :

1- mettre l'appareil sous tension et vérifier que l'alimentation électrique est suffisante ;
2- laisser au repos environ 5 minutes avant de procéder aux prochaine étapes ;
3- ajuster le zéro et la valeur maximale de l'échelle des concentrations par les deux boutons appropriés;
4- mesurer la température de l'eau étalon ou de l'air humide ;
5- ajuster l'appareil à la température mesurée au moyen du bouton appro-prié (plusieurs appareils sont équipés d'un compensateur de température automatique) ;
6- si disponible, plonger la sonde dans l'eau à 0 mg/l et ajuster le zéro par le bouton d'étalonnage (non pas le zéro de l'échelle, item 3) ;
7- plonger la sonde dans de l'eau à la saturation ou la laisser dans le petit contenant rempli d'air humide, ajuster la valeur à la saturation pour la température mesurée en se référant à une table de concentration d'oxygène (certains appareils indiquent la con-centration à la saturation en %, il faut donc ajuster la calibration pour que l'indicateur soit à 100 %) ;
8- il est très important pour les appareils qui ne sont pas munis d'un ajustement automatique de la température de ra-juster manuellement l'appareil à la température de l'eau avant d'effectuer chaque mesure de l'oxygène ;
9- effectuer les mesures de l'eau tout en agitant légèrement la sonde.

Attentions particulières

1- Autant que possible, effectuer l'étalonnage dans un milieu ni trop chaud ou ni trop froid et dont la température est le plus près possible de celle de l'eau à mesurer ;
2- il faut effectuer l'étalonnage de l'oxymètre à chaque fois qu'on l'utilise ;
3- il faut changer régulièrement la membrane de la sonde et la solution de KCl (une fois par mois) ;
4- il est important de maintenir la sonde en permanence dans un milieu humide lorsque l'oxymètre est remisé ;
5- il faut entreposer l'oxymètre dans un endroit tempéré et sec.

4.5 Moyens de contrôle

Il est important de s'assurer que les bassins d'élevage recèlent en permanence d'une concentration d'oxygène supérieure à 65 % de la saturation à la sortie des bassins. Pour arriver à cela, il y a bien évidemment la nécessité d'oxygéner l'eau. Il existe une pano-plie de moyens pour oxygéner l'eau, soit par aération ou introduction d'oxygène pur. La description de ces moyens est l'objet d'un cours en soi que nous ne pouvons pas élaborer ici.

Certaines pratiques piscicoles contribuent également à maintenir la concentration en oxygène suffisante dans les bassins. Le savoir-faire et l'expérience du pisciculteur à observer le comportement du poisson aident grandement à régulariser la consommation d'oxygène des poissons. La digestion des aliments et le stress sont deux facteurs qui font augmenter considérablement la consommation d'oxygène. Le pisciculteur doit adap-ter l'alimentation des poissons en prévision d'éviter de créer des pointes de consommation d'oxygène. Il est préférable de

distribuer les aliments en plusieurs petites portions plutôt que de donner des grosses portions qui entraînent une surcon-sommation d'oxygène. De même, le choix des moments de la journée a de l'importance pour distribuer les aliments. Il est préférable de nourrir tôt le matin et en fin de journée pendant les périodes chaudes de l'été par exemple. Le pisciculteur doit également observer le comportement du poisson pen-dant l'alimentation. En effet, l'apparition d'un problème de santé ou de détérioration de la qualité du milieu se traduit souvent par une baisse de l'appétit. L'alimentation doit alors être réduite aussitôt afin de préserver plus d'oxygène au poisson qui est en difficulté.

4.6 Références

Belaud A. 1995. Oxygénation de l'eau en aquaculture intensive. Collection POLYTECH de l'I.N.P. de Toulouse. Cépaduès-Éditions, France. 207 p.

5.0 Azote gazeux (N_2)

5.1 Nature et provenance

L'azote (N_2) est un gaz inerte qui est le plus abondant de tous les autres gaz qui composent l'air, où il occupe 78 % du volume (Tableau 1). Il est soumis, comme les autres gaz de l'air que sont l'oxygène (O_2) et le dioxyde de carbone (CO_2), à une pression partielle qui le fait diffuser dans l'eau. Sa concentration est d'environ 18 mg/l dans l'eau à une température de 10 °C (Tableau 2). L'azote gazeux est présent dans n'im-porte laquelle eau. Il se retrouve dans l'eau de surface en situation d'équilibre, selon sa pression partielle dans l'air, comme les autres gaz. Cependant, il n'en va pas de même dans les eaux souterraines, où l'azote gazeux se retrouve le plus souvent en surconcentration par rapport aux eaux de surface. Cela est dû à la respiration des bactéries présentes dans le sol qui con-somment l'oxygène de l'eau tout au long de son infiltration dans le sol. Or, cet oxygène consommé est remplacé en volume par de l'azote, qui lui n'est pas utilisé, et l'azote se retrouve ainsi en plus forte concentration dans l'eau souterraine.

L'utilisation de l'eau souterraine, de plus en plus abondante par les pisciculteurs, est une source de surconcentration en azote gazeux dans les eaux d'élevage. Par ailleurs, certaines pratiques courantes en pisciculture, comme le pompage, le chauffage et l'aéra-tion sous pression de l'eau, entraînent un déséquilibre des gaz dissous, ce qui peut résulter également en une sursaturation des gaz totaux dissous, dont une sursaturation en azote. Les mécanismes principaux ont été décrits en détail par un auteur américain nommé Colt (Hussenot et Leclercq 1987) :

- **l'entraînement des bulles** par tout procédé naturel ou technologique, comme les chutes, les cascades, les aérateurs, les conduites forcées, les tubes en U ou comme un incident de pompage par prise d'air à l'aspiration ;

- **le chauffage de l'eau**, souvent utilisé à l'alevinage, provoque systématiquement une sursaturation de tous les gaz par la diminution de leur solubilité à tempé-rature croissante. Ex : une élévation de la température de l'eau de 5 °C à 12 °C crée une sursaturation totale des gaz de 118 % ;

- **le mélange des eaux** de températures différentes, même si les deux eaux sont initialement à l'équilibre. Pour la même raison que le chauffage direct de l'eau, le réchauffement d'une eau froide par une eau plus chaude entraîne la diminution de la solubilité des gaz dissous ;

- **la photosynthèse** qui se manifeste dans les étangs chargés d'algues vertes, en période de forte intensité lumineuse, entraîne de fortes productions d'oxygène dissous. Cela crée une sursaturation des gaz totaux dissous dû au surplus d'oxy-gène, lequel ne crée pas de problème pour le poisson. Cependant, la respi-ration des algues pendant la nuit créera un déficit important en oxygène, lequel peut être

assez important pour affecter la respiration des poissons ;

- **l'action des bactéries** peut modifier la concentration des gaz dissous. C'est le cas des eaux souterraines où la respi-ration des bactéries dans les couches supérieures du sol a diminué le niveau d'oxygène et augmenté celui de l'azote et du gaz carbonique.

5.2 Toxicité

Dans l'air comme dans l'eau, l'azote est respiré par les animaux et les poissons, c'est-à-dire qu'il diffuse dans le sang de ces derniers par le processus respiratoire, mais il n'est pas utilisé dans le métabolisme, à l'inverse de l'oxygène qui lui est consommé par l'activité métabolique. Les animaux et les poissons absorbent l'azote parce qu'ils respirent tous les gaz présents, le pro-cessus respiratoire n'étant pas sélectif au niveau des gaz absorbés. Les gaz pénètrent tous, par simple diffusion reliée à leur pression partielle, à l'intérieur du sang des mammifères par les poumons et chez les poissons par les branchies.
L'azote se retrouve donc inévitablement dans le sang des poissons en concentration proportionnelle à sa pression partielle dans l'eau. Si l'azote est en sursaturation dans l'eau, il se retrouvera nécessairement en sursaturation dans le sang du poisson. Ainsi, il peut apparaître une sursaturation en azote gazeux qui produira des mortalités chro-niques légères et des signes cliniques variés (comportement anormal, yeux exorbités, etc.) et des mortalités aiguës dans des cas d'aggravation du phénomène (embolie ga-zeuse, maladie de la bulle).

La concentration d'un gaz peut être exprimée par sa pression partielle et la sursaturation d'un seul gaz peut ne pas entraîner la maladie de la bulle si la somme des pressions partielles de tous les gaz dans l'eau est inférieure ou égale à la pression barométrique (somme des pressions par-tielles de tous les gaz dans l'air). La sursaturation gazeuse apparaît seulement lorsque la pression partielle de tous les gaz est supérieure à la pression barométrique (Hussenot et Leclercq 1987).

5.3 Limites de tolérance des salmonidés

Idéalement, il est préférable que l'eau d'éle-vage ne recèle aucune sursaturation en azote gazeux. Cependant en pratique, il est difficile d'atteindre ce niveau de saturation exactement à 100 %. Les petits poissons dont l'activité respiratoire est plus grande et dont les vaisseaux sanguins sont plus petits que les gros poissons sont plus sensibles à la sursaturation en gaz. Il est donc recom-mandé les niveaux maximums suivants :

- alevinage : 102 % ΔP = 15 mm Hg ;
- engraissement : 105 % ΔP = 38 mm Hg.

5.4 Dosage

L'azote (N_2) est associé aux autres gaz présents dans l'air pour constituer la pression atmosphérique, laquelle varie selon l'altitude. Au niveau de la mer, elle est de 760 mm de mercure (Hg) (14,52 lbs/po^2). Dans l'eau, on retrouve ces mêmes gaz, et à la saturation, leur pression totale est iden-tique à celle de l'air, soit 760 mm de Hg. Dans l'air et dans l'eau, les pressions partielles de l'oxygène et de l'azote totalisent 743 mm de Hg, soit près de 98 % de la pression atmosphérique. Lorsqu'il y a une sous-saturation ou une sursaturation de ces gaz dans l'eau, la pression totale dans l'eau est inférieure ou supérieure à 760 mm de Hg. Avec le temps, comme l'eau n'est pas totalement imperméable à la diffusion des gaz, il y a un rétablissement de l'équilibre des pressions partielles entre les deux milieux.

Une sursaturation en azote gazeux se mesure en utilisant un manomètre à pres-sion de grande précision (± 1 mm Hg), appelé tensionomètre. Ce dernier mesure la pression totale des gaz dans l'eau dans un situation comparable à la mesure de la pression d'un pneu légèrement troué, d'où les gaz

s'échappent lentement. Cet appareil est constitué d'une sonde dans laquelle est enroulé un micro-tube très long, lequel est perméable aux gaz et imperméable à l'eau. La sonde est reliée à un boîtier électronique qui contient un amplificateur de pression et un afficheur de la pression mesurée par la sonde. Le tensionomètre mesure la diffé-rence de pression de tous les gaz de l'eau par rapport à la pression atmosphérique du moment. Afin de déterminer la part de cette pression attribuable à l'azote gazeux exclu-sivement, il faut connaître la pression atmosphérique du moment, la concentration en oxygène et la température de l'eau. Un calcul mathématique, réalisé à partir des données recueillies et de tables de cons-tantes, nous permet de déterminer le niveau de saturation en azote. Ce calcul se présente ainsi :

$$\text{Sursaturation en azote } N_2\ (\%) = 100 \times \frac{Pa \pm \Delta P - ([O_2] \times (0{,}5318 / KBu)) - Pvap}{0{,}7902\ (Pa - Pvap)}$$

Pa : pression atmosphérique du moment, mesurée avec le tensionomètre (ex. = 750 mm Hg).

ΔP : différentiel de pression entre l'air et l'eau, lecture de l'appareil (ex. = + 25 mm Hg).

$[O_2]$: concentration d'oxygène de l'eau, mesurée avec un oxymètre (ex. = 9 mg/l, température = 10°C).

KBu : coefficient de Bunsen, table de référence (ex. = 0,03816 à 10°C).

Pvap : pression de vapeur d'eau, table de référence (ex. = 9,21 mm Hg à 10°C).

$$\text{Sursaturation en azote } N_2\ (\%) = 100 \times \frac{750 + 25 - (9 \times (0{,}5318 / 0{,}03816)) - 9{,}21}{0{,}7902\ (750 - 9{,}21)}$$

$$\text{Sursaturation en azote } N_2\ (\%) = 100 \times \frac{640{,}37}{585{,}37} = 109{,}4\ \%$$

5.5 Moyens de contrôle

Il est indispensable pour les entreprises qui utilisent de l'eau souterraine et celles qui font le chauffage de l'eau d'effectuer un dégazage de l'eau à la source préala-blement à son utilisation. Une colonne d'aération-dégazage est toute indiquée pour effectuer ce travail. Il s'agit tout sim-plement d'un tuyau placé à la verticale et ouvert à l'air libre aux deux extrémités. L'intérieur de la colonne doit être rempli sur toute sa hauteur d'un garnissage qui peut être de matériaux variés (modules spé-cifiques, bouts de tuyau de plastique, quadrillage de plastique enroulé, etc.). La hauteur du garnissage qui sert à fractionner l'eau et à favoriser son contact avec l'air dans une colonne doit être de 1,5 mètre. L'eau est amenée à l'extrémité supérieure de la colonne d'où elle s'écoule en chute libre. L'air s'introduit dans l'extrémité inférieure de la colonne par un effet de cheminée. La colonne doit être dimen-sionnée selon le débit d'eau à traiter, lequel

peut se situer entre 200 et 250 $m^3/h/m^2$ de section d'écoulement.

Pour éliminer les sursaturations qui ne pourraient pas être supprimées à la source, les techniques les plus couramment utili-sées sont les cascades, les aérateurs de surface et le bullage produit par les diffuseurs.

5.6 Références

Belaud A. 1995. Oxygénation de l'eau en aquaculture intensive. Collection POLYTECH de l'I.N.P. de Toulouse. Cépaduès-Éditions, France. 207 p.

Hussenot, J. et D. Leclercq 1987. La sur-saturation des gaz dissous, un phénomène souvent mal connu en aquaculture. Aqua Revue (11) :27-31.

6.0 Dioxyde de carbone (CO_2)

6.1 Nature et provenance

Le dioxyde de carbone (CO_2) est un gaz. Il est présent dans l'eau et provient de 2 sources :

1- de la dissolution du CO_2 de l'air ;
2- de la respiration des poissons et des autres organismes vivants

Tableau 4 : Composition de l'air et pressions individuelles des gaz à la pression atmosphérique de 760 mm Hg et à la température de 10 °C

Gaz	Volumes (% ds air sec)	Pressions partielles (mm Hg)	Concentrations (mg/l)
Azote (N_2)	78,1	586	973
Oxygène (O_2)	21	157	260
Vapeur d'eau	exclue	9	
Argon (Ar)	0,93	7	11,6
Dioxyde de carbone (CO_2)	0,03	0,2	0,37
Total	100	760	1245

1- La dissolution du CO_2 de l'air

Le CO_2 de l'air diffuse dans l'eau sous l'influence de sa pression partielle dans l'air selon la loi des gaz. Les proportions en volume et les pressions partielles de chacun des gaz qui composent l'air sont données au Tableau 4. Le CO_2 est en très faible concentration dans l'air, c'est d'ailleurs le gaz le moins abondant. Il occupe 0,03 % seulement du volume de l'air et sa pression partielle n'y est que de 0,2 mm Hg sur les 760 mm Hg de pression totale.
La quantité de CO_2 que peut contenir l'eau est limitée par l'état de saturation. C'est la concentration maximale du gaz que peut contenir l'eau dans un état d'équilibre avec l'air, dépendant de la pression atmos-phérique, de la température et de la salinité de l'eau (Tableau 5).

Tableau 5 : Concentrations à la saturation des gaz atmosphériques dissous dans l'eau douce à une température de 10 °C

Azote (N_2)	586	18,14

Oxygène (O_2)	157	11,28
Argon (Ar)	7	0,69
Dioxyde de carbone (CO_2)	0,2	0,74
Total	750,2	30,85

La concentration de CO_2 dans l'eau en provenance de l'air est faible, elle n'est que de 0,74 mg/l à la saturation. La respiration des organismes vivants est une source plus importante de CO_2 dans l'eau d'élevage.

2-Respiration des organismes vivants

La respiration des poissons et des autres organismes vivants, tels que les bactéries, sont des producteurs importants de CO_2 dans l'eau d'élevage. La production de CO_2 peut être calculée exactement par la consommation d'oxygène, sachant que 32 g d'oxygène consommé entraîne l'appa-rition de 44 g de CO_2 (Barnabé 1986). Cependant, le CO_2 s'accumule peu dans l'eau à cause de sa grande solubilité (25 fois celle de l'oxygène) et aussi de sa transformation en bicarbonates et carbo-nates en présence de l'eau.

6.2 Toxicité

L'effet adverse du CO_2 sur les poissons provient de son interférence dans le processus respiratoire quand sa con-centration est trop élevée. Quand la concentration de CO_2 augmente dans l'eau, elle augmente également dans le sang et fait diminuer son pH. Cette diminution du pH du sang fait diminuer la capacité de l'hémoglobine à transporter l'O_2 (SIGMA 1983). Les effets adverses du CO_2 pro-viennent donc principalement de son influence sur le pH de l'eau et du sang. En présence d'une concentration élevée en O_2 et d'un bon pouvoir tampon de l'eau (alcalinité > 20 mg/l) le CO_2 est moins un problème. Sa concentration pourrait aller jusqu'à 20 mg/l sans affecter les poissons si l'O_2 est abondant.

6.3 Limites de tolérance des salmonidés

La limite de tolérance des salmonidés pour le CO_2 se situe environ à 10 mg/l pour maintenir des bonnes conditions d'élevage (Belaud 1996). Une concentration maxi-male de 20 mg/l de CO_2 devrait fournir une bonne protection pour les poissons tant que les concentrations en oxygène dissous sont élevées (SIGMA 1983).

Des essais que nous avons réalisés au Québec sur le transport de salmonidés en sacs remplis d'oxygène pur ont montré une augmentation graduelle du CO_2 pour attein-dre des concentrations de 30 à 40 mg/l après 1 à 3 heures de rétention (Morin et Hansen 1997). Malgré des concentrations aussi élevées, les ouananiches et les ombles de fontaine dans les sacs main-tenus en mouvement par un brassage, lequel favorise les échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère d'oxygène pur, n'étaient pas affectés après une durée de 3 heures. Dans un des sacs maintenu immobile, les ouananiches ont montré des signes évidents d'inconfort après que la concentration de CO_2 eut atteint 30 mg/l. Il est bien évident que des concentrations aussi élevées, qui sont inévitables pendant le transport, ne sont pas acceptables dans les bassins d'élevage.

6.4 Effets du CO_2 sur le pH de l'eau

Le CO_2 dissous dans l'eau se dissocie facilement et a un effet sur le pH. Cette transformation chimique du CO_2 s'appelle le système acide carbonique (H_2CO_3) - bicarbonate (HCO_3^-) - carbonate (CO_3^{-2}), lequel joue un rôle tampon qui contribue à stabiliser le pH de l'eau. Le CO_2 s'associe en premier avec la molécule d'eau pour former

un acide faible appelé acide car-bonique, selon la réaction suivante :

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$$

Ensuite, l'acide carbonique (H_2CO_3) se dissocie en bicarbonate (HCO_3^-) et en carbonate (CO_3^{-2}) selon le pH de l'eau, selon la réaction suivante :

$$H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{-2}$$

Les proportions de chacune des formes acide carbonique, bicarbonate et carbonate sont données au Tableau 6.

Tableau 6 : Concentrations molaires en % de l'acide carbonique et des ions bicarbonate et carbonate selon le pH de l'eau

pH	H_2CO_3 acide carbonique	$\leftrightarrow$ $H^+ + HCO_3^-$ bicarbonate	$\leftrightarrow$ $H^+ + CO_3^{-2}$ carbonate
6,0	75,8	24,2	0
6,5	49,7	50,3	0
7,0	23,6	76,4	0
7,5	8,8	91,2	0
8,0	3,0	96,7	0,3
8,5	1,0	98,1	0,9

L'acide carbonique contribue à abaisser le pH de l'eau et à augmenter l'acidité. Le CO_2 se présente sous cette forme dans une proportion de 75,8 % à un pH de 6. À pH 7, c'est la forme bicarbonate qui prédo-mine dans une proportion de 76,4 %. La forme carbonate n'est présente qu'à un pH très élevé supérieur à 9.

6.5 Dosage

Le dosage du gaz carbonique peut s'effectuer par une analyse chimique, la titration. Les principes de la titration sont présentés dans le dosage de l'alcalinité. Lorsque l'alcalinité et le pH de l'eau à analyser sont connus, il est également possible de déterminer la concentration du CO_2 par une méthode de calcul.

Particularités de la titration : Puisque le gaz carbonique est volatil, il est important d'effectuer l'analyse de l'échantillon d'eau dans les plus brefs délais. Le point de virage (changement de couleur) est difficile à déterminer.

6.7 Moyens de contrôle

Selon Belaud (1996) l'excrétion du CO_2 dans l'eau est rendue aisée par :

- une meilleure diffusibilité (par rapport à l'oxygène) à travers les branchies et au sein de l'eau ;
- une meilleure solubilité du CO_2 dans l'eau (environ 25 fois plus soluble que l'oxygène) ;
- la conversion d'une partie du CO_2 excrété en bicarbonate et carbonate.

En pisciculture, on ne rencontre guère de problème de CO_2 produit par les poissons, si ce n'est dans les cas d'eaux acides, où les bicarbonates, quasiment inexistants, ne peuvent jouer le rôle d'absorber l'acidité produite par ce gaz d'excrétion (Belaud 1996).

6.8 Références

Barnabé, G. 1986. Aquaculture, Volume 1. Technique et Documentation - Lavoisier, 11 rue Lavoisier 75384, Paris, Cedex 08, ISBN 2-85206-302-6, 521 p.

Belaud A. 1996. Oxygénation de l'eau en aquaculture intensive. Cépaduès-Éditions, 111, rue Nicolas-Vauquelin, F31100 Toulouse, France.207 p.

Morin R. et L. Hansen 1997. Transport des poissons en sacs. Expérience réalisée au Centre écologique du Lac Saint-Jean le 19 février 1997. MAPAQ, 200, chemin Sainte-Foy, 12e, Québec, G1R 4X6. 10 p.

SIGMA Environmental Consultants Ltd 1983. Summary of water quality criteria for salmonids fishes. Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 53-58.

7.0 Ammoniac (NH_3-NH_4^+), Nitrites (NO_2^-), Nitrates (NO_3^-)

7.1 Nature et provenance

L'ammoniac se présente sous deux formes dans l'eau, soit l'ammoniac gazeux non ionisé (NH_3) et l'ion ammonium (NH_4^+). La forme NH_3 est un gaz incolore qui possède une odeur piquante bien distincte (CCME 1987). La digestion des protéines, qui constituent 40 % à 50 % de l'aliment à salmonidés, produit ce résidu. La pro-duction d'ammoniac est donc directement dépendante de la quantité d'aliment servie aux poissons. Elle est d'environ 25 à 38 g/kg d'aliment (Speece 1973 et Ontario Environment 1990). Les données récoltées lors de l'échantillonnage pour la caractérisation des rejets piscicoles au Québec confirment ces valeurs, soit une concentration moyenne de 23,7 (8,3-33,3) g/kg d'aliment servi (Ouellet G. 1998). Il est à remarquer que la totalité de l'ammoniac produit par les poissons se retrouve dans l'effluent piscicole. En effet, le renouvellement rapide de l'eau dans les structures de contention en production intensive ne permet pas la nitrification bactérienne de l'ammoniac.

Le gaz ammoniac est éliminé à 90 % par simple diffusion au niveau de l'épithélium branchial. L'ammoniac est très soluble dans l'eau, où la forme non ionisée (NH_3) est en équilibre avec l'ion ammonium (NH_4^+) suivant l'équation :

$$NH_3\,(g) + H_2O \leftrightarrow NH_3 \cdot nH_2O\,(aqe) \leftrightarrow NH_4^+ + OH^- + (n\text{-}1)H_2O$$

Le terme «ammoniac total» désigne la somme des espèces ionisées et non ionisées. Les proportions de ces deux formes de l'ammoniac dans l'eau sont fonction du pH et de la température de l'eau (Tableau 7).

Tableau 7: Proportion de NH_3 (%) dans une solution aqueuse d'ammoniac ($NH_3 + NH_4^+$) pour des températures de 0 °C à 20 °C et des pH entre 6,0 et 8,5

Tempér.	pH					
(°C)	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
0	,00827	,0261	,0826	,261	,820	2,55
1	,00899	,0284	,0898	,284	,891	2,77
2	,00977	,0309	,0977	,308	,968	3,00
3	,0106	,0336	,106	,335	1,05	3,25
4	,0115	,0364	,115	,363	1,14	3,52
5	,0125	,0395	,125	,394	1,23	3,80
6	,0136	,0429	,135	,427	1,34	4,11
7	,0147	,0464	,147	,462	1,45	4,44
8	,0159	,0503	,159	,501	1,57	4,79
9	,0172	,0544	,172	,542	1,69	5,16
10	,0186	,0589	,186	,586	1,83	5,56
11	,0201	,0637	,201	,633	1,97	5,99
12	,0218	,0688	,217	,684	2,13	6,44
13	,0235	,0743	,235	,738	2,30	6,92
14	,0254	,0802	,253	,796	2,48	7,43
15	,0274	,0865	,273	,859	2,67	7,97
16	,0295	,0933	,294	,925	2,87	8,54
17	,0318	,101	,317	,996	3,08	9,14
18	,0343	,108	,342	1,07	3,31	9,78
19	,0369	,117	,368	1,15	3,56	10,5
20	,0397	,125	,396	1,24	3,82	11,2

Les nitrites (NO_2^-) et les nitrates (NO_3^-) sont des formes oxydées de l'azote ammo-niacal. Ils sont produits par des bactéries aérobies qui oxydent l'ammoniac dissout dans l'eau. Les bactéries *nitrosomonas* transforment d'abord l'ion ammonium (NH_4^+) en nitrites (NO_2^-), ensuite les bactéries *nitrobacter* transforment à leur tour les nitrites (NO_2^-) en nitrates (NO_3^-). Le nitrate est la forme la plus stable de l'azote. Les équations suivantes montrent ces réactions de nitrification :

$$NH_4^+ + CO_2 + O_2 \rightarrow \underline{nitrosomonas} \rightarrow C_5H_7O_2N + NO_2^- + H_2O + H^+$$

$$NO_2^- + CO_2 + NH_4 + O_2 + H_2O \rightarrow \underline{nitrobacter} \rightarrow C_5H_7O_2 + NO_3^- + H^+$$

Le pH optimum pour la nitrification est d'environ 8,0 et l'activité diminue rapi-dement en-dessous de pH 7,0 (CCME 1987). La vitesse de nitrification est direc-tement proportionnelle à la température de l'eau, les bactéries responsables préfèrent une température optimum de 30 °C.

7.2 Toxicité

La toxicité de l'ammoniac provient de la partie non ionisée du produit qui est sous la forme NH_3, l'ion ammonium (NH_4^+) n'étant pas toxique pour les poissons. Le poisson est d'autant plus sensible qu'il a des besoins

respiratoires élevés. Les alevins sont plus sensibles que les gros poissons. Les conditions du milieu ont une grande influence, les températures élevées et les concentrations en oxygène faibles augmentent la sensibilité des poissons (Fauré 1976).

L'ammoniac provoque l'irritation et la solidification des lamelles branchiales (Fauré 1973). Cela emmène une diminution de la surface d'absorption des branchies, ce qui crée des problèmes respiratoires aux poissons. Le milieu ammoniacal est favorable au développement des myxobactéries de la maladie des branchies et l'irritation des branchies crée un terrain favorable à l'implantation de ces bactéries. La pré-sence d'un gel blanc à la surface des branchies dû à un apport supplémentaire de mucus au niveau des lamelles branchiales, l'écartement des ouïes et l'attroupement des poissons à l'entrée d'eau sont caractéristiques de la maladie des branchies. De fortes concentrations en ammoniac entraînent la mort, alors que des concentrations sous-létales entraînent des dommages aux branchies et une diminution de la croissance (SIGMA 1983). Une ré-duction de la concentration de l'oxygène, à plus de 30 % en dessous du niveau de la saturation, augmente la toxicité aiguë et chronique de l'ammoniac.

La toxicité des nitrites est en fonction de la durée d'exposition des poissons et de leur taille (Fauré 1996). À l'inverse de l'ammoniac, les alevins semblent plus résistants que les plus gros poissons aux nitrites. Les nitrites agissent en oxydant l'hémoglobine en méthémoglobine qui ne peut transporter l'oxygène. Le poisson a des troubles respiratoires qui entraînent la mort. Lors de cette oxydation, le sang vire à la couleur brun chocolat, ce qui rend aisé le diagnostic de cette toxicité.

7.3 Limites de tolérance des salmonidés

Les seuils de toxicité de l'ammoniac varient quelque peu selon les sources d'infor-mation. D'ailleurs, certains travaux ont démontré que la tolérance des poissons à l'ammoniac peut être augmentée avec une période d'habituation et une concentration élevée en oxygène. Il est recommandé que les concentrations d'ammoniac sous la forme toxique (NH_3) ne dépassent pas 0,003 mg/l pour les alevins et de 0,006 à 0,010 mg/l pour les plus gros poissons. Le Tableau 8 donne les concentrations maxi-males en ammoniac total (NH_3 + NH_4^+) que peut contenir l'eau d'élevage pour diffé-rentes températures et pH, afin de ne pas dépasser le seuil toxique de 0,010 mg/l en ammoniac toxique (NH_3) :

Tableau 8 : Concentrations maximales en ammoniac total (NH_3+NH_4^+), selon les températures et pH de l'eau, pour ne pas dépasser le seuil seuil toxique de 0,010 mg/l en ammoniac toxique (NH_3)

Température	pH				
C	6.5	7.0	7.5	8.0	8.5
0	38,3	12,1	3,8	1,22	0,39
5	25,3	8,0	2,5	0,81	0,26
10	17,0	5,4	1,7	0,55	0,18
15	11,6	3,7	1,2	0,38	0,13
20	8,0	2,5	0,8	0,26	0,09

(adapté de SIGMA 1983)

Le seuil de toxicité pour les nitrites (NO_2^-) se situe à 0,1 mg/l. Les nitrates (NO_3^-) sont peu toxiques avec un seuil évalué à > 1 000 mg/l.

7.4 Dosage

L'azote ammoniacal (ammoniac) est dosé avec une précision acceptable par colorimétrie. La méthode colorimétrique au réactif de Nessler permet de mesurer des concentrations moyennes, comprises entre 0 et 5 mg/L environ. Le réactif de Nessler est un mélange, en milieu alcalin, d'iodure de potassium (KI) et d'iodure mercurique (HgI_2). En présence d'ammoniac, on obtient un composé jaune orangé.

Particularité : Les résultats sont plus précis lorsque la température de 20°C de l'échantillon d'eau mesuré, ainsi que le temps alloué pour le développement de la couleur (15 min.) sont respectés. Les délais d'expi-ration indiqués sur les sachets de réactifs fournis dans les trousses d'analyses de terrain Hach doivent être observés autant que possible. Les trousses doivent par ailleurs être entreposées au sec entre 10 et 25 °C, pour maximiser la conservation des produits chimiques inclus. Les consignes de sécurité (port de lunettes, lavage des mains après manipulation, garder hors de la portée des enfants) sont de mises.

7.5 Moyens de contrôle

La pollution ammoniacale est la contrainte la plus grave en pisciculture et plus particulièrement pour les eaux à pH élevé. Le procédé d'épuration par la nitrification bactérienne dans un filtre biologique n'est pas utilisable à grande échelle pour la production des salmonidés. C'est le problème de l'ammoniac qui impose de forts renouvellements de l'eau en pisciculture (Belaud 1996).

L'influence du rythme et de la fréquence des repas est capitale, l'idéal étant des nourrissages fréquents afin d'éviter des pics d'excrétions importants d'ammoniac (Marie 1983).

Un bon taux de renouvellement de l'eau et la propreté dans les bassins contribuent à diminuer les risques associés à l'ammo-niac. La recirculation de l'eau recommande d'être particulièrement vigilant pour ce contaminant.

Une bonne oxygénation assure que les nitrites (NO_2^-) se transforment rapidement en nitrates non toxiques (NO_3^-).

7.6 Références

Belaud A. 1996. Oxygénation de l'eau en aquaculture intensive. Cépaduès-Éditions, 111, rue Nicolas-Vauquelin, F31100 Toulouse, France.207 p.

CCME 1987. Recommandations pour la qualité des eaux au Canada. Conseil canadien des ministres de l'environnement. Documents du CCME, a/s Publications officielles du Manitoba, 200, rue Vaugham, Winnipeg (Man.) R3C 1T5 Canada, p. 6-12 et 6-18.

Fauré, A. 1976. Bases de la gestion de l'eau en salmoniculture intensive. La Pisciculture Française (46) :11-54.

Marie, D. 1983. Toxicité des composés azotés en salmoniculture. La Pisciculture Française (72) :43-48.

Ontario Environment 1990. Aquaculture wastewater treatment : Wastewater characterization and development of appropriate treatment technologies for the Ontario trout production industry. 110 p.

Ouellet, G. 1998. Caractérisation des eaux usées de stations piscicoles québécoises. MAPAQ, Direction de l'innovation et des technologies. 35 p.

Speece, R.E. 1973. Trout metabolism characteristics and the rational design of nitrification facilities for water reuse in hatcheries. Trans. Amer. Fisher. Soc. (2) :323-334.

SIGMA Environmental Consultants Ltd 1983. Summary of water quality criteria for salmonids fishes. Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 36-48.

8.0 Solides en suspension (MES)

8.1 Nature et provenance

Les solides en suspension (MES) proviennent de deux sources, ils peuvent être déjà présents dans l'eau d'approvisionnement de la station piscicole et sont inévitablement produits par l'élevage. Les eaux de surface et principalement les cours d'eau, encore plus que les lacs, sont susceptibles de transporter des MES. Les périodes de dégel, qui s'accompagnent de crues des eaux, entraînent un transport considérable de particules en suspension dans la plupart des cours d'eau. Les eaux souterraines qui sont filtrées par le sol sont généralement exemptes de MES.

Dans l'élevage, l'excrétion des fèces par les poissons et les restes d'aliments non consommés (10 % à 15 %) constituent une source constante de MES. Une partie des solides peut se solubiliser en proportion variable dépendant principalement du temps de séjour dans l'eau. La masse pro-duite des MES représente environ 200 à 400 g/kg de nourriture fournie (Ontario Environment 1990). Les échantillonnages réalisés au Québec pour caractériser les rejets piscicoles ont permis de déterminer que les MES représentaient 170 (70 - 300) g/kg de nourriture fournie dans les effluents en amont de l'étang de sédimentation (Ouellet, G. 1998). Comparativement à l'ammoniac qui se retrouve en totalité dans l'effluent piscicole, une partie des MES est sédimentée tout au long de son parcours dans les bassins d'élevage et ne se retrouve plus dans ce dernier.

8.2 Toxicité

Les œufs en incubation, qui dépendent des échanges gazeux au niveau de la coquille de l'œuf pour leur approvisionnement en O_2 et l'élimination du CO_2 et de l'ammoniac, ont besoin d'une eau limpide qui ne laisse pas de dépôts à la surface de l'œuf (SIGMA 1983). Autrement, l'accumulation importante de particules solides sur les œufs peut entraîner leur suffocation. Par ailleurs, le dépôt de MES sur les œufs affecte la circulation homogène de l'eau à travers les œufs en créant des zones de courants préférentielles. Il diminue aussi l'efficacité des traitements au vert de mala-chite contre les champignons, le produit ne pouvant atteindre la surface de l'œuf. Les MES peuvent également servir de substrat pour la croissance d'organismes nuisibles dans l'incubateur.

Les structures fines des branchies de petits poissons sont plus sensibles à la contamination et au colmatage par les solides en suspension. Les gros poissons, par contre, peuvent mieux supporter la présence de ces particules.

8.3 Limites de tolérance des salmonidés

Il y a donc deux niveaux de tolérance qui sont donnés pour les salmonidés, soit un seuil très bas pour les œufs et alevins et l'autre plus élevé pour le plus gros poisson. SIGMA (1993) a retenu les seuils suivants suite à une revue de littérature :

- incubation et alevinage : 3 mg/l ;
- engraissement : 25 mg/l.

Un seuil de 80 mg/l est aussi publié dans plusieurs tableaux se rapportant aux cri-tères de qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés.

Les seuils létaux seraient très élevés pour les salmonidés, de l'ordre de 270 mg/l pendant 2 à 12 semaines et de quelque 2 000 mg/l pour une période de 4 jours (SIGMA 1983). La nature des MES pourrait avoir une certaine importance dans le niveau de tolérance des poissons.

8.4 Dosage

Le dosage précis des MES est fait en laboratoire. Il consiste en une filtration sur un filtre de 1,2 µ (microns) suivie d'une dessiccation à 105 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

8.5 Moyens de contrôle

La sédimentation des MES, tout au long du processus d'élevage, contribue grande-ment à diminuer leur concentration. Les bassins de type raceways, les auges d'alevinage et les étangs en terre favorisent la sédimentation. Les bassins autonetto-yants de type circulaire pour l'engrais-sement ou les petits bassins suédois pour l'alevinage sont autonettoyants et ne retiennent pas les MES. Il faut donc prévoir avec l'utilisation de ces types de bassins des équipements pour la filtration des MES entre les paliers de bassins.

Les pratiques piscicoles relatives à la distribution des aliments et à l'entretien des bassins sont également d'une grande importance pour diminuer la présence des MES dans l'eau d'élevage. Les pertes d'ali-ments non consommés par les poissons et le manque d'entretien des bassins contri-buent grandement à la détérioration de la qualité de l'eau.

8.6 Références

Ontario Environment 1990. Aquaculture wastewater treatment : Wastewater characterization and development of appropriate treatment technologies for the Ontario trout production industry. 110 p.

Ouellet, G. 1998. Caractérisation des eaux usées de stations piscicoles québécoises. MAPAQ, Direction de l'innovation et des technologies. 35 p.

SIGMA Environmental Consultants Ltd 1983. Summary of water quality criteria for salmonids fishes. Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 59-64.

9.0 Fer (Fe^{+2}- Fe^{+3})

9.1 Nature et provenance

Le fer (Fe) est un métal. Il existe 2 formes du fer dans l'eau :

1- réduite ou dissoute: fer ferreux (Fe^{+2}) ;
2- précipitée ou oxydée: fer ferrique (Fe^{+3}).

Dans les eaux de surface bien oxygénées, le fer se retrouve sous la forme précipitée (Fe^{+3}). Dans les eaux souterraines, la forme dissoute (Fe^{+2}) est la plus abondante. Les eaux de surface contiennent généralement < 0,5 mg/l de fer, mais les eaux sou-terraines peuvent en contenir beaucoup plus. Plusieurs sortes de roches enfouies dans le sous-sol peuvent contenir du fer qui est libéré par le lessivage des eaux sou-terraines. La résurgence ou le pompage de ces eaux ramène le fer dissous en surface.

Les ions ferriques (Fe^{+3}) sont moins solubles, ils précipitent et produisent les taches rougeâtres que l'on observe à l'inté-rieur de la plomberie et sur les parois des bassins d'élevage. À de fortes concen-trations, le fer peut provoquer une activité bactérienne dans les conduites et sur certains équipements (ex. : colonne d'aération-dégazage). Ces bactéries qui croissent sur le fer sont filamenteuses et prennent la forme d'un amas gélatineux de couleur rouille.

La solubilité du fer dans l'eau augmente quand le pH diminue, les eaux acides sont plus susceptibles de contenir du fer.

9.2 Toxicité

Le fer ne présente aucun inconvénient du point de vue physiologique pour le poisson. Son effet adverse est physique par l'inter-férence qu'il fait au niveau de la respiration. L'action des sels de fer sur les poissons réside essentiellement dans le fait que ce

métal, sous la forme précipitée (Fe^{+3}), se dépose sur les œufs et les branchies. Il colmate ainsi les œufs et les branchies, ce qui a pour effet de faire interférence aux échanges gazeux au niveau de la coquille de l'œuf et de l'épithélium branchial. Le fer détériore aussi les branchies par abrasion. Plus les structures des branchies sont fines et plus elles sont fragiles et faciles à colmater, or les petit poissons (alevins) sont plus sensibles à la présence de fer dans l'eau et supportent des concentrations moins élevées que les gros poissons.

9.3 Limites de tolérance des salmonidés

Les limites de tolérance des salmonidés au fer sont de :

- 0,3 mg/l pour les alevins ;
- 0,5 mg/l pour les gros poissons.

9.4 Dosage

La méthode de dosage la plus utilisée pour le fer est une méthode d'analyse chimique, la colorimétrie.

Principes de la méthode d'analyse colorimétrique : Cette méthode fonctionne par l'ajout d'un produit qui réagit chimiquement avec les composés de l'eau à analyser, en formant un complexe coloré. L'intensité de la coloration obtenue est directement proportionnelle à la quantité du composé présent dans l'eau et dont on désire connaître la teneur. Lorsque l'on effectue le dosage du fer par exemple, plus la quantité de fer est importante, plus la coloration orangée est foncée (intense).

Colorimétrie du fer : Le fer ferreux (Fe^{+2}) donne, avec le composé chimique orthophénanthroline, un complexe rouge orangé. Le fer ferrique (Fe^{+3}) est transformé en fer ferreux (Fe^{+2}) par l'ajout d'un agent réducteur, afin de permettre le dosage du fer total.

Particularité : Afin de permettre le développement complet de la couleur, il est recommandé de laisser l'échantillon d'eau se réchauffer à 20°C.

Les délais de péremption indiqués sur les sachets de réactifs fournis dans les trousses d'analyses de terrain doivent être respectés. Les trousses doivent par ailleurs être entreposées au sec entre 10 °C et 25 °C, pour maximiser la conservation des produits chimiques.

9.5 Moyens de contrôle

Il n'y a pas de moyen de contrôle ou d'élimination du fer qui soit utilisable de façon rentable en pisciculture. Tout au plus de l'eau légèrement ferreuse peut être utilisée en conjonction avec d'autre eau qui ne l'est pas, ce qui diminue la concen-tration en fer. Le fer présent dans l'eau à l'entrée de la station piscicole va diminuer de concentration tout au long de son parcours dans les bassins d'élevage parce qu'il précipite graduellement sous l'effet de l'oxydation ($Fe^{+2} \rightarrow Fe^{+3}$). Cependant, il se dépose sur tout substrat baigné par l'eau incluant les bassins, la tuyauterie, les œufs et les branchies de poissons.

Les procédés qui existent dans l'industrie pour l'élimination du fer sont trop coûteux et trop contraignants pour utiliser en pisciculture. Le procédé le plus simple consiste à faire précipiter le fer en milieu alcalin et à l'extraire ensuite de l'eau par décantation ou par filtration. Cette technique a déjà été expérimentée dans une station piscicole québécoise en 1988. Elle consiste à faire passer l'eau dans un récipient pour l'aérer de manière à transformer le fer ferreux (Fe^{+2}) en fer ferrique (Fe^{+3}) en présence d'une concentration de chaux hydratée ($Ca(OH)_2$) qui augmente le pH de l'eau (> 8,5). Les ions hydroxyde (OH^-) libérés par la chaux dissociée s'associent au Fe^{+3} pour former du $Fe(OH)_3$ qui précipite fortement. La décantation et/ou la filtration enlèvent ensuite facilement le précipité. Le problème est de

ramener ensuite le pH à un niveau acceptable pour l'élevage, ce qui requiert l'addition d'un acide dans l'eau.

Références

SIGMA Environmental Consultants Ltd 1983. Summary of water quality criteria for salmonids fishes. Department of Fisheries and Oceans, SECL 8067, p. 121-124.

10.0 Synthèse des paramètres de la qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés

Le Tableau 9 collige les limites de tolérance des salmonidés, dans des conditions d'élevage, aux différents paramètres physico-chimiques de l'eau. L'élevage des salmonidés est possible quand même en présence de certains paramètres physico-chimiques de l'eau qui sont légèrement au-delà de ces seuils, mais il faut considérer alors que les performances de la production en seront affectées.

Tableau 9: Critères de qualité de l'eau pour l'élevage des salmonidés

Groupes	Paramètres	Limites de tolérance
	Température (°C)	2 - 8 fraye et incubation 6 - 13 alevinage 5 - 18 engraissement
Acides et bases	pH	6,5 - 8,5
	Alcalinité (mg/l de $CaCO_3$)	≥ 20 - 400
	Dureté (mg/l de $CaCO_3$)	10 - 500
Gaz	Oxygène (O_2) (%)	65 - 100
	Azote gazeux (N_2) (%)	< 102 alevinage < 105 engraissement
	Dioxyde de carbone (CO_2) (mg/l)	< 12
	Sulfure d'hydrogène (H_2S) (mg/l)	< 0,002
Composés azotés	Ammoniac (NH_3) (mg/l)	< 0,003 alevinage < 0,006 - 0,0125 engraissement
	Nitrites (NO_2^-) (mg/l)	< 0,1
	Nitrates (NO_3^-) (mg/l)	< 100 - 200
Métaux	Aluminium (Al) (mg/l)	< 0,1
	Cadmium (Cd) (mg/l)	< 0,004
	Cuivre (Cu) (mg/l)	< 0,006 si alcalinité < 100 mg/l

Groupes	Paramètres	Limites de tolérance
		< 0,03 si alcalinité > 100 mg/l
	Fer (Fe) (mg/l)	< 0,3 alevinage < 0,5 engraissement
	Manganèse (Mn) (mg/l)	< 0,01
	Mercure (Hg) (mg/l)	< 0,002 - 0,1
	Nickel (Ni) (mg/l)	< 0,01 - 0,02
	Plomb (Pb) (mg/l)	< 0,03
	Zinc (Zn) (mg/l)	< 0,005 - 0,03
Solides	Solides en suspension (MES) (mg/l)	< 80

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries
et de l'Alimentation
Pêches et aquiculture commerciales
200, chemin Sainte-Foy, 12e étage
Québec (Québec) G1R 4X6
☎ : (418) 380-2100 poste 3374
: (418) 380-2182